

# Analyse multi-échelle expérimentale et numérique du comportement d'une liaison

**P. BUTAUD, G.CHEVALLIER, E.SADOULET-REBOUL**

Univ. Bourgogne Franche-Comté - FEMTO-ST Institute, CNRS/UFC/ENSMM/UTBM

Département Mécanique Appliquée, 24 rue de l'épître, 25000 Besançon

Email : Gael.Chevallier@univ-fcomte.fr

## Résumé :

*Les vibrations des structures assemblées sont très dépendantes du comportement mécanique des liaisons. La rigidité et l'amortissement induits par ces liaisons dépendent essentiellement des conditions de contact / décollement et d'adhérence / glissement. La mesure des champs de déplacement dans les zones de liaisons et à proximité de celles-ci constitue donc un enjeu important pour la mise au point de modèles prédictifs. Ce travail porte sur l'utilisation de la vélocimétrie laser en trois dimensions pour la caractérisation du comportement de ces liaisons. Un assemblage constitué de deux poutres boulonnées en plusieurs points a été testé lors d'essais vibratoires sous excitations aléatoire et harmonique. La mesure du champ de déplacement global permet d'évaluer l'évolution des paramètres modaux en fonction de l'amplitude des vibrations. Des mesures du champ de déplacement local permettent d'évaluer les conditions de contact et de frottement dans chaque assemblage. Des corrélations avec les modèles sont également proposées.*

## Abstract :

*The vibrations of the assembled structures are very dependent on the mechanical behavior of the connections. The stiffness and the damping induced by these connections depend essentially on the conditions of contact / separation and of stick / slip. The measurement of the displacement fields in and near the connection zones is therefore an important issue for the development of predictive models. This work deals with the use of three-dimensional laser velocimetry to characterize the behavior of these bonds. An assembly consisting of two beams bolted at several points was tested during vibratory tests under random and harmonic excitations. The measurement of the global displacement field makes possible to evaluate the evolution of the modal parameters as a function of the amplitude of the vibrations. Measurements of the local displacement field make it possible to evaluate the contact and friction conditions in each assembly. Correlations with models are also proposed.*

**Mots clefs : vibrométrie laser ; structure assemblée**

## 1 Introduction

La modélisation et la prédiction de l'amortissement des vibrations demeurent de grands défis car les phénomènes physiques impliqués dans la dissipation d'énergie sont physiquement complexes. L'amortissement peut être induit par différents comportements telles que la viscoélasticité, les pertes de charges dans les fluides ou le frottement entre les solides.

Les liaisons boulonnées ou rivetées sont largement utilisées pour relier les différents composants des mécanismes et des structures. Dans ces liaisons, c'est le frottement qui est responsable de l'amortissement. Parmi toutes les études qui mettent l'accent sur l'amortissement par frottement, il est courant de séparer les travaux qui mettent l'accent sur les dissipations d'énergie provenant du glissement macroscopique, de ceux qui étudient la dissipation d'énergie par micro-glissement. Dans la première catégorie, l'amortissement est dû à des zones de friction de grande dimension, voir Berthillier et al. [1] par exemple. Dans ce cas, les simulations et les tests sont faciles à réaliser car la zone de contact est connue et le glissement survient dans toute la zone de contact. Dans le second cas, l'amortissement provient d'un glissement partiel entre les pièces. Donc, le contact effectif est mal connu et le glissement dans les interfaces est partiel. Il a été montré expérimentalement par de nombreux auteurs, voir Pian [2] par exemple. Dans cette situation les fréquences de résonance dépendent fortement de l'amplitude des vibrations. Cette dépendance est liée aux variations de la pression de contact et aux variations des contraintes de cisaillement. Cet effet est clairement montré par les études numériques, voir Festjens et al. [3] et Caignot et al. [4]. Pour réaliser une expérience permettant de caractériser finement les comportements mécaniques, une attention particulière doit être accordée à la maîtrise du couplage entre les charges tangentielles et normales dans les liaisons. Ce couplage rend les expériences assez difficiles à réaliser car la limite de glissement dépend de la dynamique de charge normale.

Il existe de nombreuses façons expérimentales de mettre en évidence des effets non linéaires tels que la dépendance des fréquences propres et de l'amortissement aux amplitudes, qui sont très courants pour les amortisseurs de friction. L'estimation de la perte d'énergie ou du facteur de qualité peut se faire à travers la bande passante des réponses de chaque mode. La perte d'énergie peut également être estimée par une analyse quasi-statique [5]. Dans ce cas, l'objectif est de construire des ratios d'énergie pour diverses trajectoires de chargement, de façon très similaire aux techniques "Dynamic Mechanical Analysis" (DMA) pour les propriétés viscoélastiques. Une analyse transitoire peut également être effectuée : l'approche classique consiste à exciter la structure avec un marteau d'impact [6]. Une approche plus originale est d'obtenir une réponse transitoire mono-modale en déconnectant le dispositif d'excitation sinusoïdale sur la structure pour passer de la réponse stationnaire à la réponse transitoire [7] et [8]. Cette procédure s'appelle *stop-sine*. Moyennant des techniques de traitement du signal adaptées [9], elle permet d'obtenir les *backbones* du système, c'est-à-dire la dépendance de la fréquence naturelle et de l'amortissement modal à l'amplitude des vibrations.

Plus récemment, certains travaux se sont plutôt dirigés vers la mesure de champs pour accéder à des données cinématiques plus détaillées spatialement. Un tel niveau de détail peut permettre d'accéder directement aux conditions de contact [10], ou de mieux modéliser les structures pour se servir de la simulation numérique afin d'accéder par extension aux conditions de contact. L'objectif de ce travail est d'utiliser la vibrométrie laser à balayage comme moyen de mesure des champs cinématiques lors des vibrations stationnaires pour tenter de relier l'évolution des indicateurs globaux que sont les fréquences et amortissements modaux à la cinématique détaillée de la structure.

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif conçu pour réaliser ces travaux est un assemblage de deux plaques avec les dimensions suivantes  $200 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ . Les poutres sont reliées entre elles par trois vis M4 espacées de 15 mm. Afin d'éviter les incertitudes sur la zone effective de contact, des "patches" de contact ont été usinés sous chaque vis avec une sur-épaisseur de 0.5 mm de forme carrée de  $12 \text{ mm}^2$  pour les vis externes

et  $18 \text{ mm}^2$  pour la vis centrale (Figure 1). Une rondelle piézoélectrique Physik Instrumente (PI) Round PICMA PD080.3x est placée sous chaque vis externe pour permettre de modifier légèrement son serrage pendant l'utilisation si un desserrage spontané devait intervenir. Huit jauges de déformation sont collées à l'intérieur de la tête de chaque vis pour contrôler la force effective de serrage durant les essais, Figure 2. Ce dispositif est conçu et réalisé par la société Texys. La force de serrage initiale appliquée sur les vis externes est de 10 cNm, 40 cNm ou 80 cNm, pour observer son influence sur la réponse de la structure. La force de serrage de la vis centrale est constante pendant les essais, cette vis assure la rigidité de l'ensemble, le couple de serrage appliqué est de 80 cNm. Le couple de serrage est obtenu avec une clé dynamométrique et est vérifié lors de l'expérience grâce à l'instrumentation des vis.

La structure est encastrée d'un côté (Figure 2). Pour être aussi proche que possible d'une liaison parfaite, une longueur de 30 mm est vissée dans un bloc d'acier. L'assemblage est excité à côté de l'encastrement par un exciteur électromagnétique modèle K2004E01 de modalshop. Deux signaux d'excitation ont été utilisés : une excitation aléatoire à bande de fréquence contrôlée entre 20 Hz et 2000 Hz et un pas-sinus variant entre 900 Hz et 1100 Hz. Afin de mettre en évidence le comportement non linéaire de la structure, l'amplitude d'excitation varie entre [0.1 1] N pour un bruit blanc et [0.1 5] N pour un test harmonique.

Les mesures sont effectuées à l'aide du vibromètre laser à balayage PSV-500 de Polytec, sa distance de travail est comprise entre 125 mm et 100 m, sa résolution minimale est de 10 nanomètres par seconde par racine carrée de fréquence. La structure est scannée sur 118 points pendant l'excitation aléatoire et sur 92 points pour les tests harmoniques. L'acquisition est répétée six fois et moyennée pour construire l'estimateur statistique H1 de la fonction de réponse en fréquence entre le signal d'excitation et la vitesse mesurée. Les résultats présentés dans les sections suivantes sont tracés sous la forme de Fonction de réponse en fréquence Vitesse sur Force.

### 3 Résultats de mesure

Dans cette section sont présentés les résultats de mesure obtenus sous excitation aléatoire. Des résultats ont également été obtenus sous excitation harmonique en régime stationnaire. Ils ne sont pas présentés ici pour ne pas alourdir le papier.

#### 3.1 Fonctions de Réponse en Fréquence obtenues sous excitation aléatoire

La première analyse est effectuée pour observer l'influence de l'amplitude d'excitation. Ce test est effectué pour deux amplitudes d'excitation (0.1 N et 0.5 N). Le résultat à 10 cNm est présenté sur la Figure 3). Pour ce niveau de serrage, comme pour les autres, on remarque un comportement non linéaire : l'augmentation de l'amplitude d'excitation induit un décalage de la fréquence de résonance près des basses fréquences et entraîne une augmentation de l'amortissement.

La deuxième analyse est effectuée pour observer l'influence du couple de serrage, seul le serrage des vis externes est modifié. Les trois couples de serrage sont testés. La FRF est mesurée avec une excitation de 0.1 N, Figure 4. Pour cette amplitude d'excitation, comme pour l'autre, on observe un comportement non linéaire : la diminution du serrage induit un décalage de la fréquence de résonance vers les basses fréquences et entraîne une augmentation de l'amortissement.

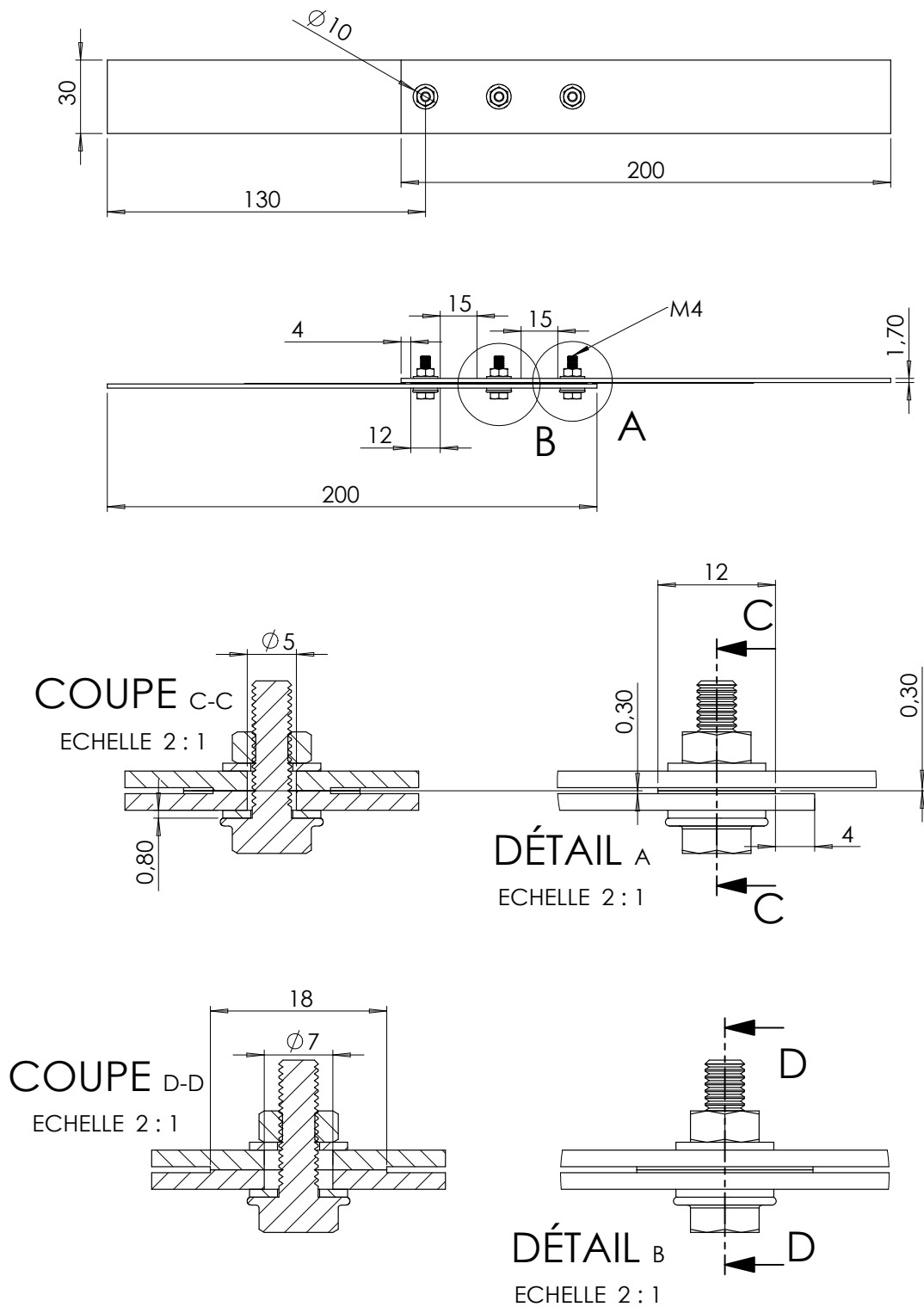


FIGURE 1 – Plans de définition de l'assemblage testé. Vue de détail sur chacun des boulons et notamment sur les patchs de contact

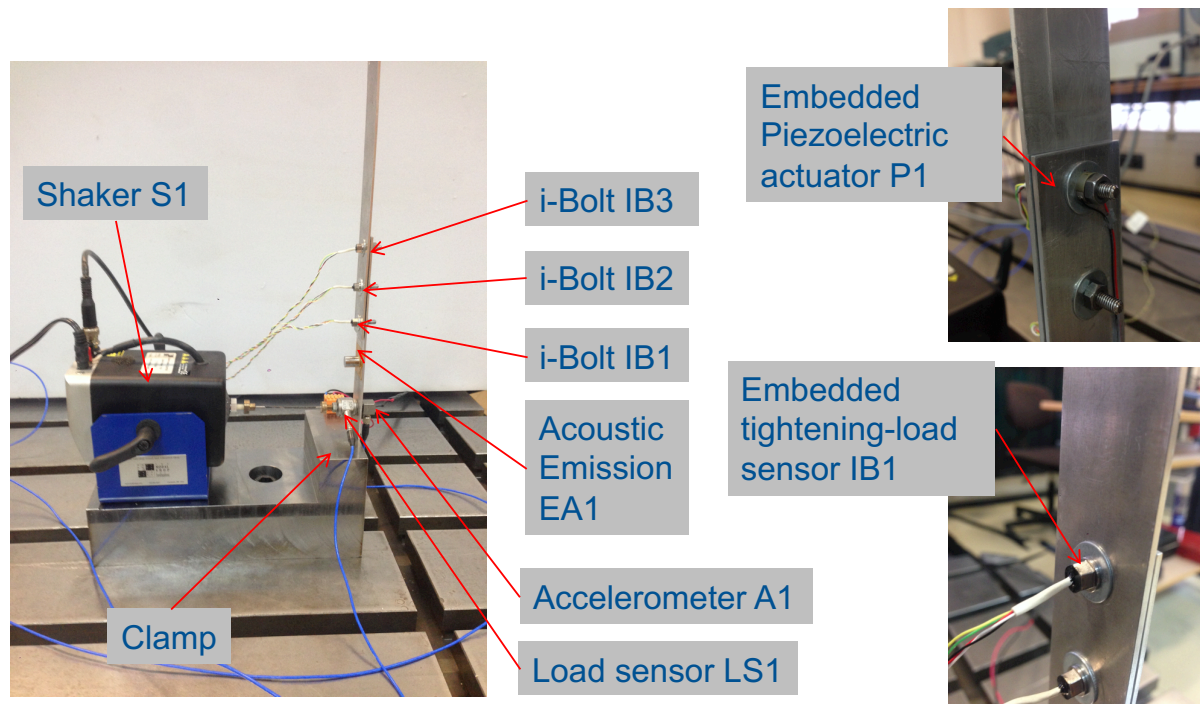


FIGURE 2 – (gauche) Vue d'ensemble du setup. (droit) Détails sur les boulons instrumentés avec actionneurs piézo-électriques pour modifier le serrage en fonctionnement et capteur pour mesurer le serrage en fonctionnement

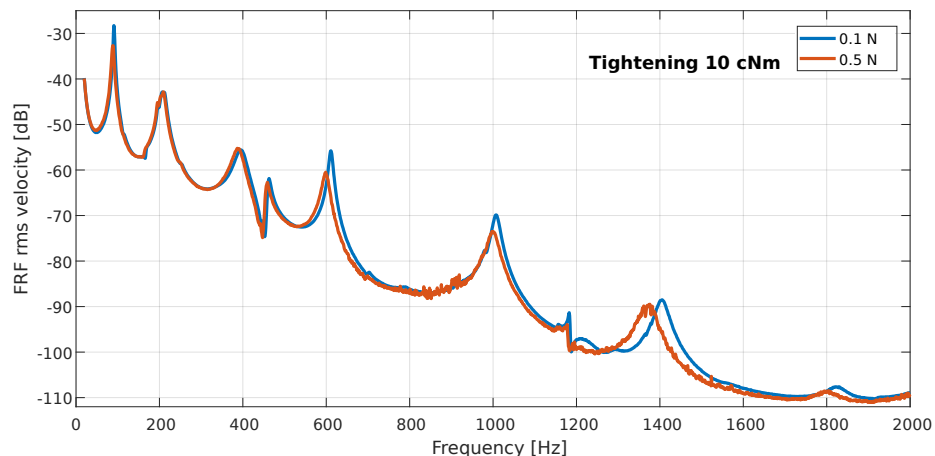


FIGURE 3 – Influence de l'amplitude d'excitation, à 10 cNm de niveau de serrage, pour une excitation aléatoire du type de bruit blanc entre [20-2000] Hz.

### 3.2 Reconstitution des champs cinématiques et comparaison avec les essais

Les effets du serrage et de l'amplitude vibratoire ne sont pas explicables par l'observation des données macroscopiques. L'idée est donc de procéder en deux temps. Dans un premier temps, il s'agit de scanner la structure avec une centaine de points de mesure localisés notamment dans la zone de liaison. Dans un deuxième de temps, il s'agit de construire un modèle validé de la structure capable de reproduire les vibrations observées expérimentalement. Le modèle EF est un modèle mécanique discrétisé avec plus

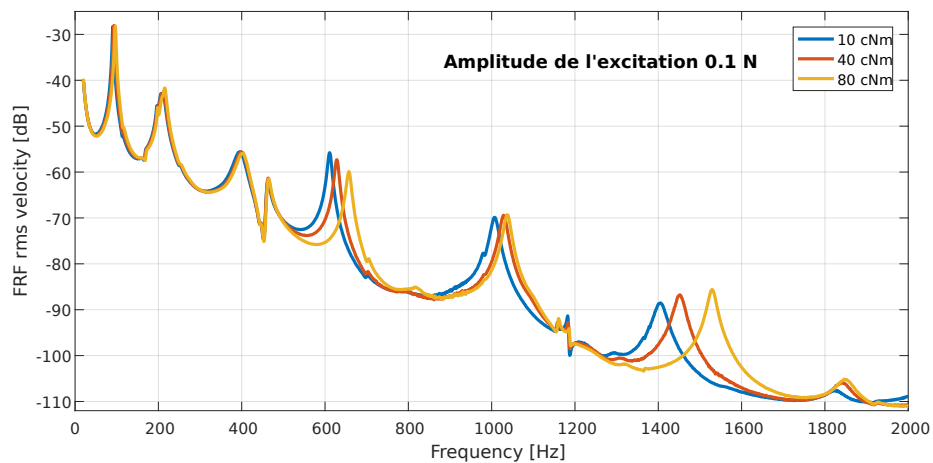


FIGURE 4 – Influence du couple de serrage, à une amplitude d'excitation de 0.1 N, pour une excitation aléatoire du type de bruit blanc entre [20-2000] Hz.

de 100 000 éléments hexaédriques à 20 noeuds. Il peut inclure les non linéarités de contact et frottement selon l'étude réalisée. Une première étude a consisté à extraire les modes propres linéaires de la structure pour les comparer aux déformées mesurées expérimentalement à bas niveau d'excitation, voir Figure 5.

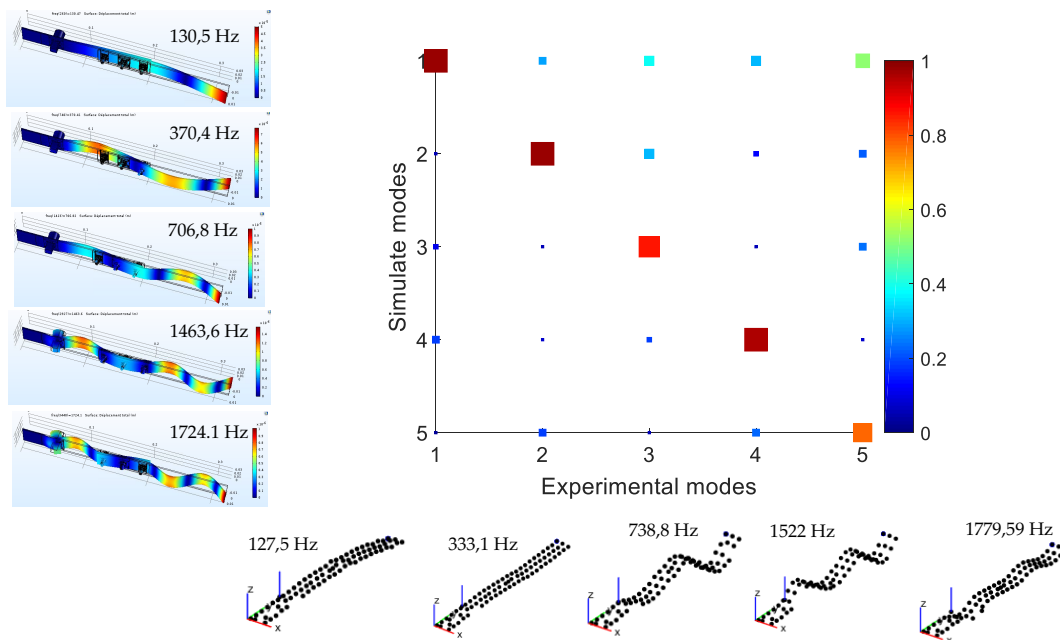


FIGURE 5 – Résultat de la mesure de champs et de la simulation numérique pour la caractérisation des modes propres de vibration.

Le Modal Assurance Criterium (MAC) permet de valider la colinéarité cinématique des modes calculés et mesurés. La proximité des fréquences calculées et mesurées (<10%) permet de valider que les données (matériaux, surfaces de contact effective, géométrie) du modèle sont proches de la réalité. Le modèle peut alors être utilisé pour déterminer des données innaccessibles à la mesure comme l'état tribologique dans la zone de contact. La Figure 6 montre l'état de la liaison pour un chargement cinématique issu de la mesure de champs et appliqué sur un modèle EF localisé sur une des trois liaisons. Ce résultat montre

la capacité de la simulation couplée à la mesure détaillée d'accéder à des données inaccessibles par la mesure seule.

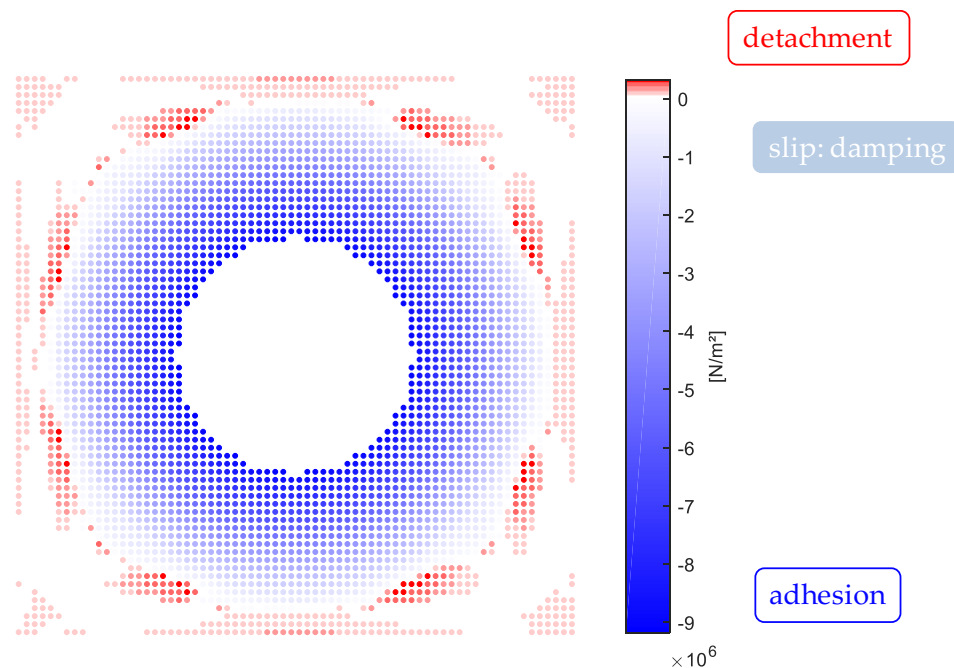


FIGURE 6 – Résultats de Simulation pour la caractérisation de l'état tribologique dans les liaisons.

## 4 Conclusions

Ce travail vise à montrer l'apport de la vibrométrie laser pour la mise au point de modèle des données détaillées à quiconque souhaite améliorer ses outils de simulation. Il est également démontré que la réalité peut être augmentée grâce à l'usage de la simulation numérique. En marge du sujet principal, nous montrons par l'analyse des résultats que ce type de liaisons peut être fonctionnalisé pour le contrôle des vibrations, pour amortir et adapter les fréquences naturelles d'une structure assemblée.

## Acknowledgments

Les auteurs souhaitent remercier le « Fond Interministeriel unique » qui finance le projet CLIMA et la « Bourse-Oréal UNESCO Pour les Femmes et la Science » qui encourage les femmes à faire des sciences.

## Références

- [1] M. Berthillier, C. Dupont, R. Mondal, and J.J. Barrau, Blades forced response analysis with friction dampers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. **120**, 468-474, 1998.
- [2] THH. Pian, Structural damping of a simple built-up beam with riveted joints in bending. *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. **24**, 35-38, 1957.
- [3] H. Festjens, G. Chevallier, and J.-L. Dion, A numerical tool for the design of assembled structures under dynamic loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. **75**, 170-177, 2013.

- [4] A. Caignot, P. Ladeveze, D. Neron, and J.-F. Durand, Virtual testing for the prediction of damping in joints. *Engineering Computations*, Vol. **27(5)**, 621-644, 2010.
- [5] H. Ahmadian and H. Alali, Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. **21(2)**, 1041-1050, 2007.
- [6] Y. Ren and C. Beards, Identification of joint properties of a structure using frf data. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **186(4)**, 567-587, 1995.
- [7] L. Heller, E. Foltete, and J. Piranda, Experimental identification of nonlinear dynamic properties of built-up structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **327(1)**, 183-196, 2009.
- [8] J.-L. Dion, G. Chevallier, and N. Peyret, Improvement of measurement techniques for damping induced by micro-sliding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. **34(1-2)**, 106-115, 2012.
- [9] N. Peyret, J.-L. Dion, G. Chevallier, A framework for backbone experimental tracking : Piezoelectric actuators, stop-sine signal and Kalman filtering. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. **78**, 28-42, 2016.
- [10] M. Claeys, J.-J. Sinou, J.-P. Lambelin, R. Todeschini, Experiments and numerical simulations of nonlinear vibration responses of an assembly with friction joints - Application on a test structure named « Harmony ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. **70**, 1097-1116, 2016